

ESTUDIO DE LA FISURACIÓN EN MUESTRAS DE HORMIGÓN DEBIDO A LA CORROSIÓN DE LAS ARMADURAS

B. Sanz^{1*}, J. Planas¹, J.M. Sancho²

¹Departamento de Ciencia de Materiales, Universidad Politécnica de Madrid, E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, C/ Profesor Aranguren s/n, 28040 Madrid, España.

²Departamento de Estructuras de Edificación, Universidad Politécnica de Madrid, E.T.S. de Arquitectura, Avda. Juan de Herrera 4, 28040, Madrid, España.

*E-mail: bsanz@mater.upm.es

RESUMEN

La corrosión del acero en estructuras de hormigón armado puede causar fisuración debido a la expansión volumétrica del óxido respecto al acero inicial. Para estudiar esta fisuración, se realizaron ensayos de corrosión acelerada en primas de hormigón con un tubo liso de acero como armadura. Después de corrosión, se estudió el patrón de fisuración resultante en secciones transversales de los prismas y se realizó un análisis cuantitativo para comparar el patrón entre muestras. Complementariamente, los ensayos se simularon utilizando un modelo que reproduce la expansión del óxido y que trabaja con elementos finitos con fisura embebida adaptable para reproducir la fractura del hormigón según el modelo de fisura cohesiva estándar. Los resultados numéricos coincidieron con los experimentales, aunque en secciones con tubo se observó mayor sensibilidad a los parámetros del óxido que en secciones con barra maciza, que se investigará en el futuro para obtener información sobre el óxido.

ABSTRACT

Corrosion of steel in reinforced concrete structures can lead to cracking of concrete due to the volumetric expansion of the oxide respect to the steel. To study such a cracking, accelerated corrosion tests were conducted using concrete prisms with a smooth steel tube as reinforcement. After corrosion, the pattern of cracking was studied in cross-sections of the prisms and a quantitative analysis was carried out in order to compare the pattern between samples. Complementary, the tests were numerically simulated using a model that reproduces the volumetric expansion of the oxide and that works with finite elements with an embedded adaptable crack to reproduce cracking of concrete following the standard cohesive model. The numerical and experimental results coincided, although sections with a tube resulted to be more sensitive to the parameters of oxide than sections with a solid bar, which may constitute a means to investigate the oxide generated.

PALABRAS CLAVE: Fisura cohesiva, Corrosión acelerada, Elementos finitos.

1. INTRODUCCIÓN

La corrosión de las armaduras es una de las principales causas de deterioro de las estructuras de hormigón armado que están expuestas a ambientes marinos o sales para deshielo. La formación del óxido conlleva una disminución de sección de acero, pero además tiene otros efectos negativos, como la fisuración del recubrimiento de hormigón, debido a que el óxido ocupa un volumen mayor que el acero inicial, y la pérdida de adherencia entre el acero y el hormigón [1, 2].

Para estudiar la fisuración causada por la corrosión, los autores programaron un modelo llamado *junta expansiva* que reproduce la expansión volumétrica del óxido [3], presentado en congresos anteriores. Este modelo trabaja con elementos finitos con fisura embebida adaptable [4] que describe la fractura del hormigón conforme al modelo de fisura cohesiva estándar introducido por Hillerborg et. al [5]. En trabajos anteriores se comprobó que el mo-

delo reproducía adecuadamente los patrones de fisuración observados en muestras sujetas a corrosión acelerada, con una fisura principal en el recubrimiento y varias fisuras secundarias alrededor del acero.

Sin embargo, un análisis más detallado, puso de manifiesto que el patrón de fisuración experimental es mucho más complejo, pues la posición exacta de las grietas difiere entre muestras con características similares y corroídas de la misma manera e incluso entre diferentes secciones de una misma muestra. Para tener en cuenta estas diferencias, se realizó un análisis cuantitativo del patrón de fisuración, que se detalla en este trabajo. Para ello, se ensayaron muestras con una instrumentación más completa que en ensayos anteriores. Complementariamente, los ensayos se simularon utilizando modelos bidimensionales de las secciones de los prismas, con un tubo como armadura. En el artículo se describen en detalle el procedimiento y los resultados experimentales y se presentan brevemente el modelo y los resultados de las simulaciones.

2. MÉTODO EXPERIMENTAL

2.1. Geometría y preparación de las muestras

Los ensayos de corrosión acelerada se llevaron a cabo en muestras de hormigón con un tubo liso como armadura, que se diseñaron para obtener una fisura principal en el recubrimiento y se trataron para forzar un campo de oxidación plano y uniforme a lo largo del eje de la armadura.

Las muestras consisten en prismas de hormigón como los que se muestran en la Fig. 1, con una sección de $100 \times 90 \text{ mm}^2$ y una altura de 90 mm, con un tubo liso de 20 mm de diámetro, 1 mm de espesor y 20 mm de recubrimiento. Nótese que la longitud de los tubos es mayor que la de los prismas, para poder realizar las conexiones eléctricas durante el ensayo.

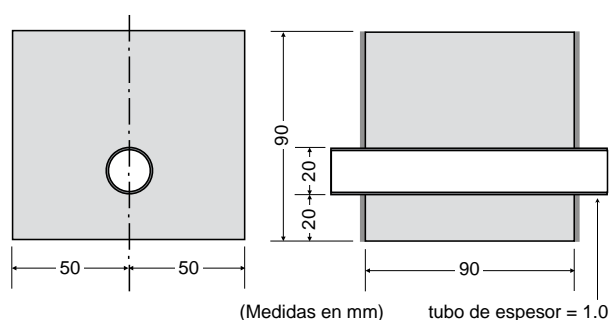


Figura 1: Geometría de las muestras utilizadas en ensayos de corrosión acelerada [3].

El hormigón se fabricó con cemento tipo Portland I 52.5R, con una relación agua/cemento igual a 0.5, con árido silíceo con tamaño máximo de 8 mm y con 3 % de CaCl_2 en peso de cemento para producir la despasivación del acero. Para mejorar su trabajabilidad, se añadieron retardador y superplastificante. Los detalles de la dosificación se especifican en la Tabla 1.

Tabla 1: Dosificación de hormigón, en peso de cemento.

Material	Proporción
Cemento	1.0
Agua	0.5
Árido fino	2.85
Árido grueso	2.05
CaCl_2	0.03
Retardador	0.01
Superplastificante	0.0013

Todas las muestras se fabricaron en una única amasada de hormigón y se almacenaron en cubetas en una cámara de curado a 20°C hasta ser ensayadas. Para evitar la corrosión de los extremos de los tubos durante el curado, previamente a la preparación del hormigón, se les aplicó una capa de esmalte, delimitando la zona de acero libre a una longitud de 80 mm en el interior de las probetas. En total se fabricaron 6 prismas, numerados de B01 a B06.

Complementariamente, se fabricaron 6 cilindros y 4 vigas con medidas estándar procedentes de la misma amasada para caracterizar el comportamiento en fractura del hormigón a 28 días mediante ensayos de compresión, brisales y de flexión en tres puntos, y se calculó una aproximación de la curva de ablandamiento del hormigón siguiendo el procedimiento descrito en [6].

2.2. Ensayos de corrosión acelerada

Después de curado, se retiró la capa de esmalte de los extremos de los tubos de acero, se impermeabilizaron las bases de los prismas de hormigón con una capa de resina epoxi y se embebió un tapón de PVC para aislar eléctricamente uno de los extremos del tubo y un anillo de PVC alrededor del extremo opuesto, como se esquematiza en la Fig. 2. Durante este proceso, la superficie lateral de los prismas se protegió con una bayeta húmeda para evitar que se secase.

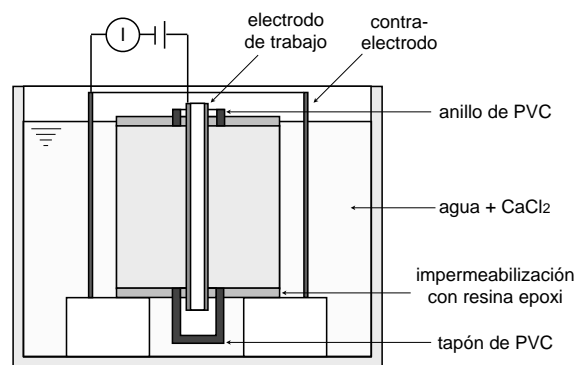


Figura 2: Croquis de los ensayos de corrosión acelerada.

Inmediatamente antes de los ensayos, se midió la corrosión inicial de las probetas, siguiendo los procedimientos descritos en [7] y [8], y se comprobó que la corrosión durante curado no fue significativa (la densidad de corriente medida fue menor que $0.13 \mu\text{A}/\text{cm}^2$).

Durante el ensayo, las muestras se sumergieron en agua con CaCl_2 , manteniendo el eje del tubo en posición vertical, de manera que el extremo sumergido es el que se protegió con el tapón de PVC, como se indica en la Fig. 2, y se ajustó el nivel de líquido hasta cubrir completamente las caras expuestas de hormigón; de aquí que se pusiera el anillo de PVC en la cara superior, para proteger el tubo de acero frente a pequeñas variaciones del nivel de agua. Como contra-electrodo se utilizó un tubo de acero inoxidable con su eje paralelo al de la armadura. Para provocar la corrosión acelerada del acero, se impuso el paso de una corriente de valor I entre el tubo –el electrodo de trabajo– y el contra-electrodo, que se midió de manera continuada. Dadas las condiciones de contorno de las probetas (aislamiento eléctrico de las bases del prisma y extremos del tubo), puede suponerse campos de corriente y deformaciones planos durante el ensayo, dando lugar a oxidación uniforme en el eje del tubo.

La intensidad se aplicó durante 3 días, con un valor nominal de 20 mA, i.e., una densidad de corriente de $400 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ para la geometría de las muestras. Esta densidad es mucho mayor que las observadas en estructuras reales [9], lo que afecta al tipo de óxido producido; sin embargo, entra dentro del rango en el que se ha comprobado que la ley de Faraday es aplicable [10].

Después del ensayo, se midió la pérdida gravimétrica en los tubos de las rebanadas centrales siguiendo el procedimiento descrito en [11] y se comparó con la pérdida teórica según la ley de Faraday, suponiendo corrosión uniforme para la intensidad medida durante el ensayo, resultando que la efectividad de la corriente fue $100\% \pm 9\%$.

2.3. Tratamiento post-corrosión para evaluar el patrón de fisuración

Después de corrosión, las muestras se cortaron en rebanadas para estudiar el patrón de fisuración y se impregnaron con resina y fluoresceína, siguiendo el procedimiento detallado en [3], que se resume en rectificar las caras de las rebanadas, secarlas hasta peso constante, extraer el aire de los poros, impregnar las rebanadas en vacío y rectificar de nuevo para eliminar el exceso de resina, una vez curada. Para la impregnación, se utilizó resina de baja viscosidad con 1.5 mg/ml de fluoresceína.

De cada prisma se impregnaron 2 rebanadas de unos 20 mm de espesor, como se indica en la Fig. 3, proporcionando el patrón de fisuración en 4 secciones diferentes. Las dos rebanadas exteriores se descartaron, para eliminar la parte del tubo con corrosión no uniforme, y la rebanada central se reservó para medir la pérdida en peso del acero. En total, se estudió el patrón de fisuración en 24 secciones procedentes de 6 muestras diferentes.

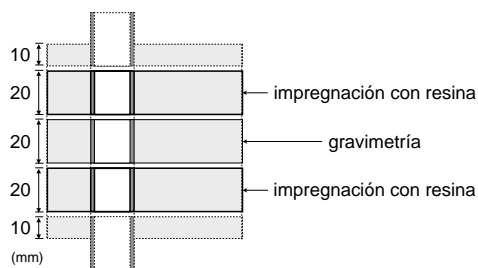


Figura 3: Esquema del uso de las rebanadas.

2.4. Análisis del patrón de fisuración

Al finalizar los ensayos de corrosión, en todos los prismas se observó una fisura principal en el recubrimiento, paralela a la armadura, pero no se detectaron más fisuras en las caras laterales. Sin embargo, al observar las secciones transversales mediante las rebanadas, se detectaron otras fisuras secundarias. En la Fig. 4 se muestra un ejemplo del patrón de fisuración de una de las muestras fotografiado bajo luz UV, en concreto de la muestra B04.

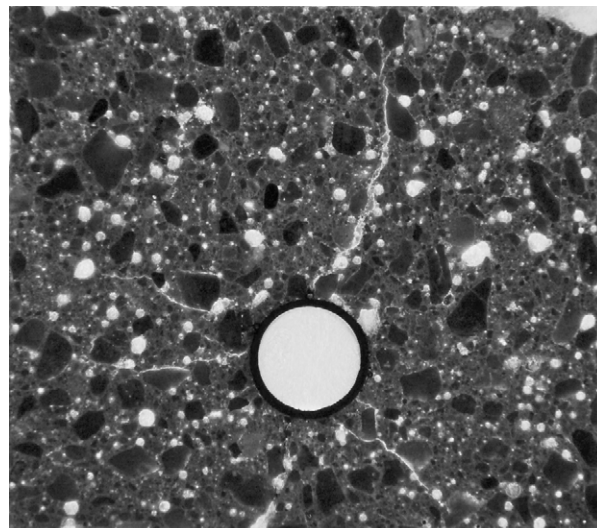


Figura 4: Ejemplo del patrón de fisuración obtenido en una de las rebanadas, fotografiado bajo luz UV.

El patrón observado en las demás rebanadas se parece mucho cualitativamente al mostrado en la figura, con una fisura principal y varias fisuras secundarias emanando del tubo hacia la superficie externa del hormigón pero sin alcanzarla. Sin embargo, un análisis detallado pone de manifiesto una estructura compleja de fisuración, con fisuras que emanan del mismo punto del tubo y luego se bifurcan (p.ej., fisuras situadas a las 9:00 en el reloj que define el tubo), o fisuras con nacimientos diferentes que después confluyen (p.ej., fisuras situadas a las 4:00 y 5:00). De hecho, el número de fisuras en los experimentos varió entre muestras e incluso entre secciones de una misma probeta.

Para evaluar cuantitativamente la distribución de las fisuras, en cada sección se evaluó el número de fisuras que emanan del tubo visibles por el ojo humano. En total se detectaron 143 fisuras. Su distribución se muestra en la Fig. 5. Como se ve, predomina el número de secciones con 5 y 6 fisuras, incluida la fisura principal, pero hay un número considerable de secciones con 4, 7 y 8 fisuras. La media fue de 6.0 fisuras por sección, con una desviación estándar elevada de 1.3 fisuras.

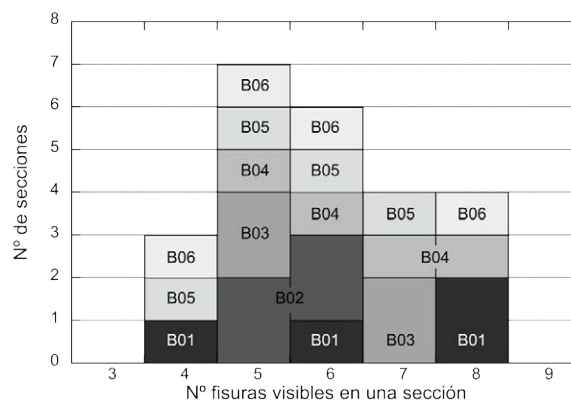


Figura 5: Distribución del número de fisuras visibles en cada sección.

Al comparar además la posición de las fisuras, se observó que su nacimiento y su camino varían apreciablemente de una muestra a otra e incluso en secciones de una misma muestra. Para cuantificar este efecto, se midió la posición angular del nacimiento de cada fisura visible en cada una de las secciones, superponiendo un círculo graduado en cada foto, como se muestra en la Fig. 6, que corresponde a una de las secciones de B03; se anotó la división de 5° más cercana a la raíz de cada fisura en la circunferencia definida por el tubo de acero.

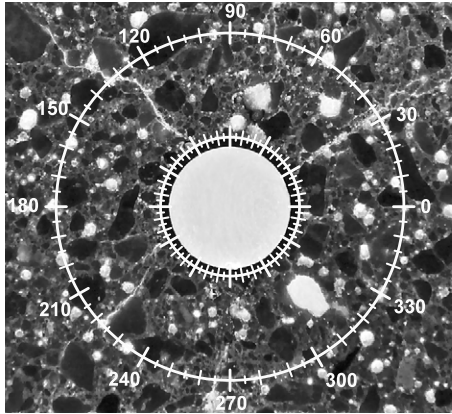


Figura 6: Ejemplo de la superposición de un círculo graduado en las fotos de las secciones para determinar la posición angular del nacimiento de las fisuras.

Los datos se procesaron y se calculó la posición media de la raíz de cada fisura en cada muestra; los resultados se representaron en diagramas polares, que se muestran en la Fig. 7.

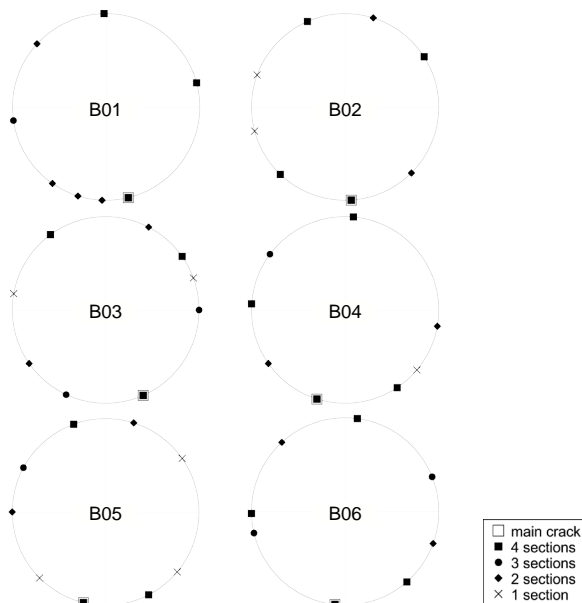


Figura 7: Diagramas polares de la posición media angular del nacimiento de las grietas en cada muestra.

La posición de una cierta grieta en una muestra determinada varió de sección a sección con una desviación estándar de 8° . Esta desviación equivale a 1.5 mm sobre la circunferencia del tubo, que está por debajo del tamaño máximo del árido. Sin embargo, cuando la posición de las fisuras se compara entre muestras diferentes, la dispersión entre grietas es tan alta que resulta prácticamente imposible encontrar una correspondencia clara entre fisuras que no sean la fisura principal, debido a la heterogeneidad intrínseca del hormigón.

3. SIMULACIONES NUMÉRICAS

3.1. Breve descripción del modelo

En las simulaciones se utilizó el modelo presentado en [3], cuyas características se resumen a continuación:

Para el hormigón se supuso un comportamiento en fractura según el modelo de fisura cohesiva estándar, introducido por Hillerborg et al. [5], según el cual las fisuras transmiten tensiones a través de sus caras siguiendo una ley de ablandamiento. Los parámetros que lo caracterizan se determinaron en ensayos mecánicos, como se ha descrito en la Sec. 2.1 y se aproximó la ley de ablandamiento por una curva lineal, que tiene una energía de fractura G_{F1} aproximadamente la mitad de la real y que está definida por la resistencia a tracción del hormigón f_t y el corte de la curva con el eje horizontal w_1 . Para simular este comportamiento, se utilizaron elementos con fisura embebida adaptable [3] en el marco de elementos finitos COFE (*Continuum Oriented Finite Elements*), que consisten en triángulos de deformación constante CST en los que las fisuras pueden adaptar su orientación al campo de tensiones hasta alcanzar una cierta apertura de fisura, que se indica mediante un factor de adaptación α' .

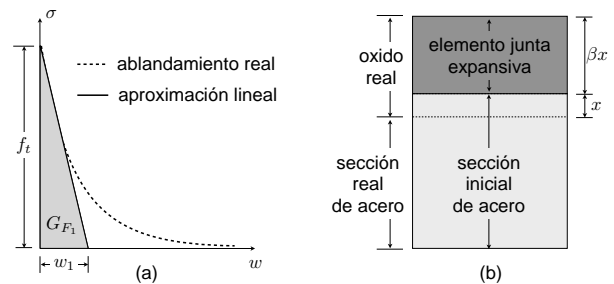


Figura 8: Curva de ablandamiento en las simulaciones (a) y croquis del elemento junta expansiva (b).

Para simular la expansión del óxido, se utilizaron elementos *junta expansiva* [3], que consisten en elementos de interfaz de cuatro nodos que incorporan un efecto de deslizamiento y despegue entre el hormigón y el acero, que se consigue disminuyendo la rigidez tangencial y reduciendo la rigidez normal sólo en el caso de tracción mediante un factor de direccionalidad η_t . Estos elementos, con espesor inicial nulo, simulan un aumento de volumen en cada paso de tiempo, suponiendo que cuando se transforma

en óxido una capa de acero de espesor x –la penetración de corrosión– tiene lugar un incremento de volumen βx , donde β es el factor de expansión del óxido, como se esquematiza en la Fig. 8(b). En el modelo se mantiene constante la sección de acero para simplificar las operaciones, lo que se tiene en cuenta calculando unas rigideces ficticias del elemento para mantener la equivalencia mecánica de los sistemas real y simulado, que resultan ser inversamente proporcionales a la penetración de corrosión; para evitar inestabilidades en los cálculos, se introducen valores de corte para las rigideces normal y tangencial k_n^0 y k_t^0 correspondientes a una cierta corrosión x_0 (ver [12, 3] para los detalles del modelo y su formulación).

3.2. Parámetros de las simulaciones

La malla se generó automáticamente utilizando el programa pre-post procesador Gmsh [13]. Para el hormigón, se utilizaron triángulos CST con fisura embebida, para el óxido elementos junta expansiva y para el acero cuadriláteros con deformaciones mejoradas supuestas. En simulaciones complementarias se determinó que 16×3 elementos por cuarto de circunferencia eran adecuados para captar la flexión del tubo. El número de elementos de óxido y de hormigón en la interfaz se fijó conforme a los de acero; en la superficie externa, el tamaño de los elementos de hormigón fue 5 veces mayor que los de la interfaz. Se aplicó una expansión radial de $20 \mu\text{m}$ en 40 pasos.

Los valores de los materiales se muestran en la Tabla 2. Para el acero se tomaron valores estándar, para el hormigón los valores medidos experimentalmente y para el óxido se eligieron los valores suponiendo un comportamiento fluido, como propusieron Molina et al. [14], pero reduciendo la rigidez tangencial y la rigidez en tracción; como punto de partida se tomaron valores de k_t^0 y η_t próximos a cero virtual.

Tabla 2: Propiedades de los materiales en las simulaciones, donde E es el módulo de elasticidad, μ el coeficiente de Poisson, f_t la resistencia a tracción, G_{F1} la energía de fractura de la curva lineal, α' el factor de adaptación de las fisuras, β el factor de expansión, x_0 la penetración de corrosión de corte, k_n^0 la rigidez normal de corte, k_t^0 la rigidez tangencial de corte y η_t el factor de reducción de la rigidez en tracción.

	Acero	Hormigón
E (GPa)	200	36.14
ν	0.3	0.2
f_t (MPa)	–	2.78
G_{F1} (N/mm)	–	59.7
α'	–	0.2
Óxido		
β	1.0	
x_0 (mm)	1.0×10^{-3}	
k_n^0 (N/mm ³)	1.0×10^6	
k_t^0 (N/mm ³)	1.0×10^{-14}	
η_t	1.0×10^{-11}	

3.3. Resultados de las simulaciones

En las simulaciones con secciones con un tubo utilizando los parámetros de la Tabla 2 se obtuvo una fisura principal y sólo una fisura secundaria diametralmente opuesta, como se muestra en la Fig. 9(a); aunque en los primeros pasos de corrosión aparecieron varias fisuras radiales, después se fueron cerrando hasta predominar una única fisura secundaria. Para reproducir el patrón de fisuración observado en los experimentos, fue necesario aumentar la rigidez tangencial del óxido. En la Fig. 9(b) se muestra el resultado obtenido para $k_t^0 = 1.0 \times 10^4 \text{ N/mm}^3$ y manteniendo el resto de parámetros.

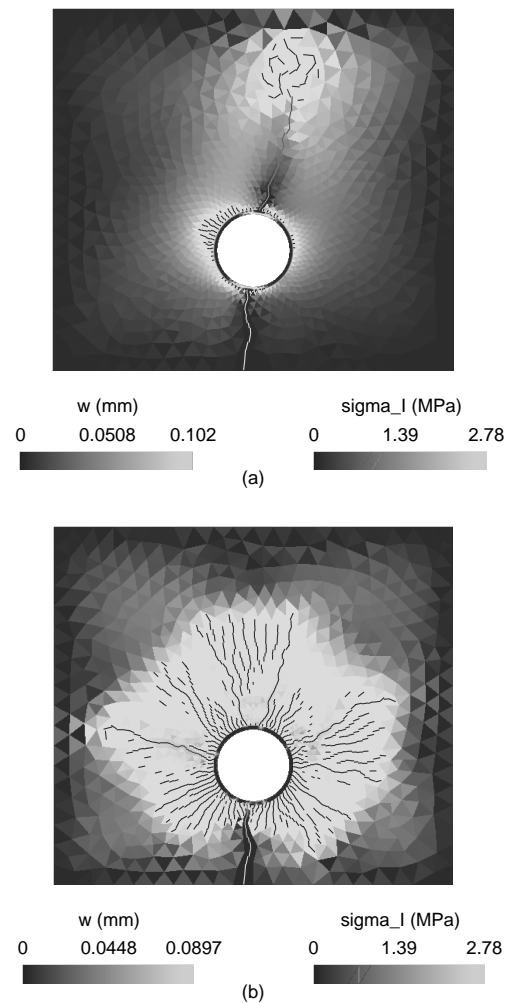


Figura 9: Mapa de tensiones y apertura de fisura obtenidos para una expansión de $20 \mu\text{m}$ con rigidez tangencial nula (a) y con un valor de $k_t^0 = 1.0 \times 10^4 \text{ N/mm}^3$ (b).

En estudios anteriores con secciones con una barra maciza como armadura en lugar del tubo, el patrón de fisuración coincidió con el experimental, incluso para rigideces tangenciales prácticamente nulas [15]. Sin embargo, en secciones con un tubo, al ser éste mucho más flexible, las propiedades de los materiales circundantes tienen

una influencia mayor. En particular, una rigidez tangencial muy alta restringe la apertura de las fisuras, como se comprobó en [3]; sin embargo, una disminución en exceso de su valor lleva a la formación de una única fisura pasante. Este efecto supone una herramienta para obtener información del óxido, que se analizará con más detalle en futuras investigaciones.

4. CONCLUSIONES

Se ha realizado un estudio cuantitativo del patrón de fisuración obtenido en muestras sujetas a corrosión acelerada. En todas las muestras se formó una fisura principal en el recubrimiento y una media de 4.0 fisuras secundarias, con una desviación estándar elevada de 1.3 fisuras. Aunque los patrones de fisuración entre diferentes muestras aparentemente son iguales, en realidad la estructura de fisuras es compleja y difiere entre muestras e incluso en secciones dentro de una misma muestra. La posición angular media del nacimiento de cada fisura se determinó con una precisión de 5°, encontrando una desviación estándar media de 8°, que es atribuible a la propia heterogeneidad del hormigón.

Los resultados obtenidos en simulaciones con un modelo que reproduce la expansión volumétrica del óxido y la fisuración del hormigón siguiendo el modelo de fisura cohesiva estándar coincidieron con los resultados de los experimentos. Sin embargo, se observó que el patrón de fisuración es sensible a algunos de los parámetros del modelo cuando se utiliza un tubo en lugar de una barra maciza de acero, debido a que el tubo tiene una flexibilidad mayor, lo que puede suponer una herramienta para obtener información sobre el óxido que se forma, que se investigará en el futuro.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la financiación recibida de la Secretaría de Estado, de Investigación, Desarrollo e Innovación del Ministerio de Economía y Competitividad a través del proyecto BIA2010-18864.

REFERENCIAS

- [1] K. Tuutti. *Corrosion of steel in concrete*, volume 4.82. Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1982.
- [2] C. Andrade, M.C. Alonso, and F.J. Molina. Cover cracking as a function of bar corrosion: Part i - experimental test. *Materials and Structures*, 26:453–464, 1993.
- [3] B. Sanz, J. Planas, and J. M. Sancho. An experimental and numerical study of the pattern of cracking of concrete due to steel reinforcement corrosion. *Engineering Fracture Mechanics*, 114(0):26–41, 12 2013.
- [4] J. M. Sancho, J. Planas, D. A. Cendon, E. Reyes, and J. C. Galvez. An embedded cohesive crack model for finite element analysis of concrete fracture. *Engineering Fracture Mechanics*, 74:75–86, 2007.
- [5] A. Hillerborg, M. Modéer, and P.E. Petersson. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and fracture elements. *Cement and concrete research*, 6:773–782, 1976.
- [6] Jaime Planas, Gustavo V. Guinea, Jaime C. Galvez, Beatriz Sanz, and Adel M. Fathy. Chapter 3. experimental determination of the stress-crack opening curve for concrete in tension. report 39. chapter 3. indirect tests for stress-crack opening curve. Technical report, RILEM TC 187-SOC Final Report, 2007.
- [7] ASTM C-876. Standard test method for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete. 1991.
- [8] RILEM TC 154-EMC. Test method for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of polarization resistance method. *Materials and Structures*, 37:623–643, 2004.
- [9] M.C. Alonso, C. Andrade, J. Rodríguez, and J.M. Díez. Factors controlling cracking of concrete affected by reinforcement corrosion. *Materials and Structures*, 31:435–441, 1998.
- [10] T. El Maaddawy and K. Soudki. Effectiveness of impressed current technique to simulate corrosion of steel reinforcement in concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 15(1):41–47, 2003.
- [11] ASTM, editor. *Standard Practice for Preparing, Cleaning and Evaluating Corrosion Test Specimens*, number G1-03, 2003.
- [12] B. Sanz, J. Planas, A. M. Fathy, and J. M. Sancho. Modelización con elementos finitos de la fisuración en el hormigón causada por la corrosión de las armaduras. *Anales de Mecánica de la Fractura*, 25:623–628, 2008.
- [13] C. Geuzaine and J.-F. Remacle. Gmsh: a three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 79(11):1309–1331, 2009.
- [14] F.J. Molina, M.C. Alonso, and C. Andrade. Cover cracking as a function of bar corrosion: Part ii - numerical model. *Materials and Structures*, 26:532–548, 1993.
- [15] B. Sanz, J. Planas, and J. M. Sancho. Parametric study of the expansive joint model for cracking of concrete due to rebar corrosion. *Anales de la Mecánica de la Fractura*, 28:475–480, 2011.